

УДК 620.165.29

**АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТЕЧКИ В  
НЕФТЕПРОВОДЕ С УЧЁТОМ ЕГО  
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

Т.Е. Мамонова, В.Н. Шкляр

Томский политехнический университет

E-mail: [stepte@tpu.ru](mailto:stepte@tpu.ru)

**Мамонова Татьяна Егоро-вна,**  
ассистент кафедры  
«Интегрированные компью-  
терные системы управления»  
Институт кибернетики ТПУ. E-  
mail: [stepte@tpu.ru](mailto:stepte@tpu.ru)

Область научных интересов:  
определение утечек в  
нефтепроводах на основе  
гидродинамических процессов в  
них, элементы искусственного  
интеллекта (нейронные сети,  
экспертные системы, нечёткая  
логика), программирование на  
языке высокого уровня C++.

**Шкляр Виктор Николаевич,**  
канд. техн. наук, доцент  
кафедры «Интегрированные  
компьютерные системы  
управления» Институт кибер-  
нетики ТПУ.

E-mail: [shvn@tpu.ru](mailto:shvn@tpu.ru)

Область научных интересов:  
мехатроника, робототехнические  
системы, определение утечек в  
нефтепроводах.

Рассматриваются алгоритмы определения параметров утечки в трубопроводах, полученные решением уравнений гидродинамических процессов, протекающих при возникновении утечек в них. Данные алгоритмы получены для участка сплошного трубопровода с учётом его геометрического профиля, без дополнительных отводов, пролегающего между двумя насосными станциями. Проверена работоспособность алгоритмов с помощью виртуального трубопровода, построенного в программном пакете COMSOL Multiphysics. Приведены результаты исследования предложенных алгоритмов.

**Ключевые слова:**

Магистральный трубопровод, утечка трубопровода, гидродинамическая модель, датчик давления, имитационная модель, гидравлический профиль трубопровода.

**Key words:**

Main pipeline, loss of pipeline, hydrodynamic model, sensor of pressure, simulation model, hydraulic pipeline profile.

В настоящее время наиболее эффективным средством транспортировки нефти и нефтепродуктов является трубопроводный транспорт, поэтому проблема обнаружения утечек в нефтепроводах является особо актуальной. Наиболее распространёнными причинами возникновения утечек в нефтепроводах являются порывы сварочных швов и несанкционированные врезки. Для определения их местоположения необходимы специальные дополнительные приборы и системы обнаружения утечек. В данной работе предлагаются алгоритмы определения местоположения и расхода утечек, полученные на основе решения уравнений, описывающих гидродинамические процессы, протекающие в трубе для участка, расположенного между двумя насосными станциями и имеющего геометрический профиль. Параметры утечки рассчитываются по пьезометрическому профилю, определяемому датчиками давления, расположенными по длине трубопровода и на насосных станциях, с его дальнейшим преобразованием в гидравлический профиль с учётом геометрии трубы.

Ранее в работах [1–3] были получены алгоритмы определения параметров утечки по профилю давления для прямолинейного горизонтального трубопровода на основе решения гидродинамической модели, описывающей процессы утечки в трубопроводе в виде дифференциального уравнения в частных производных и граничных условиях. Данные алгоритмы основаны на показаниях четырёх датчиков давления, расположенных по длине трубопровода и на насосных станциях и имеют вид:

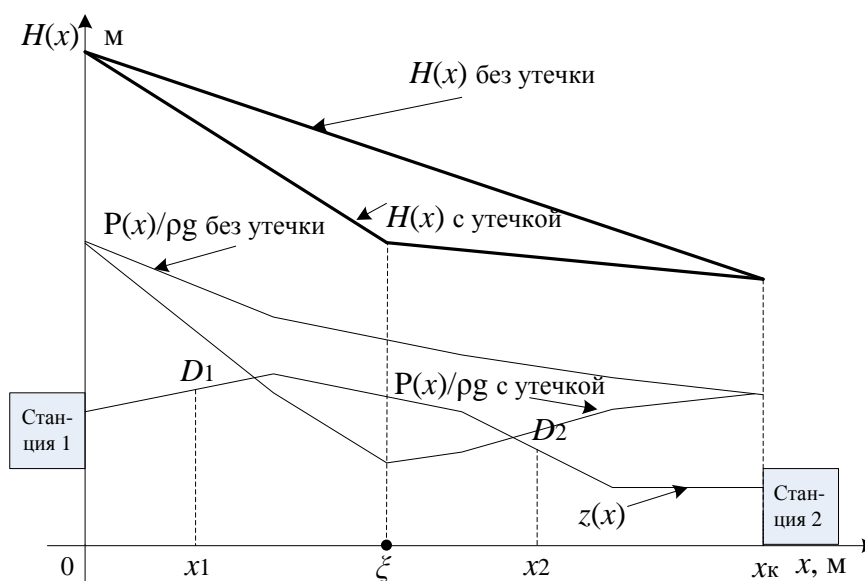
$$\xi = \frac{x_1 \left( P_2 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_2 \right) l}{(l - x_2) \left( P_1 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_1 \right) + x_1 \left( P_2 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_2 \right)}, \quad (1)$$

$$G_T = \frac{x_1 \left( P_2 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_2 \right) - (l - x_2) \left( P_1 - P_H - \frac{P_K - P_H}{l} x_1 \right)}{lx_1 \frac{A(l - x_2)}{F}},$$

где  $A = \lambda w / 2d$ ;  $P_1$  и  $P_2$  – давление на первом и втором датчиках, расположенных по длине трубопровода, Па;  $P_H$ ,  $P_K$  – давления, соответственно, в начале и на конце участка трубопровода, Па;  $x_1$ ,  $x_2$  – координата места установки датчиков давления, м;  $l$ ,  $d$  – длина и внутренний диаметр трубопровода, м;  $F$  – площадь сечения трубы, м<sup>2</sup>;  $G_T$  – массовый расход утечки, кг/с;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трубопровода;  $w$  – скорость движения нефтепродукта, м/с;  $\xi$  – координата места утечки, м.

Данные алгоритмы предназначены для частного случая трубопровода – прямолинейного без наклона – и их использование при других конфигурациях геометрического профиля будет не корректно. Для учёта геометрического профиля трубопровода необходимо перейти к характеристикам  $H(x)$ , называемым гидравлическим профилем давления.

Для гидравлического профиля трубопровода действуют следующие условия [1]: 1) в трубопроводе с геометрическим профилем  $z(x)$  без утечки его гидравлический профиль будет иметь прямолинейную зависимость; 2) при наличии утечки будет наблюдаться надлом гидравлического профиля трубопровода в месте прорыва трубы (рис. 1).



**Рис. 1.** Гидравлические профили трубопровода сложной геометрической формы с утечкой и без утечки

Уравнение для расчёта гидравлического уклона имеет вид [4]:

$$H(x) = z(x) + \frac{P(x)}{\rho g}, \quad (2)$$

где  $z(x)$  – геометрический профиль, м;  $P(x)$  – профиль давления по длине трубопровода, Па;  $P(x)/\rho g$  – пьезометрический профиль, м;  $\rho$  – плотность транспортируемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Предполагается, что трубопровод является полностью заполненным, без дополнительных вставок и отводов. По длине трубопровода с координатами  $x_1$  и  $x_2$  располагаются два датчика давления на высотах  $z_1$  и  $z_2$  по отношению к горизонту и значениями напоров  $H_1$  и  $H_2$ .

Получаем алгоритмы определения параметров утечки трубопровода при учёте его геометрического профиля:

$$\xi = \frac{P_2 - P_H + \rho g(z_2 - z_H) - \frac{x_1}{l - x_2}(P_K - P_2) - \frac{\rho g x_1}{l - x_2}(z_K - z_2)}{\frac{1}{x_1}(P_1 - P_H) + \frac{\rho g}{x_1}(z_1 - z_H) - \frac{1}{l - x_2}(P_K - P_2) - \frac{\rho g}{l - x_2}(z_K - z_2)}, \quad (3)$$

$$G_T = \frac{F \rho g}{A l^2} \left( \frac{(H_2 - H_H - z_2 - z_H)l - x_2(H_K - H_H - z_K - z_H)}{l - x_2} - \frac{(H_1 - H_H - z_1 - z_H)l - x_1(H_K - H_H - z_K - z_H)}{x_1} \right),$$

где  $d_\xi$  – условный диаметр отверстия утечки, м<sup>2</sup>;  $P_{\text{atm}}=101325$  – атмосферное давление, Па. Значение геометрического профиля в месте возникновения утечки  $z_\xi$  вычисляется по заданному геометрическому профилю при известном значении координаты утечки  $\xi$ .

Алгоритмы (1) были проверены на работоспособность в [1, 2] при использовании визуального приложения Simulink математического пакета MatLab.

Моделирование алгоритмов (4) для трубопровода с геометрическим профилем  $z(x)$  было проведено в математическом пакете COMSOL Multiphysics 3.5 [5].

COMSOL Multiphysics – это программа для конечно-элементных расчётов сложных научно-технических задач. Решение любой задачи базируется на численном решении уравнений в частных производных методом конечных элементов. Спектр задач, которые поддаются моделированию в программе, чрезвычайно широк. От классических проблем теплопроводности, диффузии и распространения волн до нелинейных уравнений типа Кортевега де Фриза и Бюргерса. Набор специальных модулей в программе охватывает практически все сферы приложений уравнений в частных производных. При моделировании в программном пакете COMSOL Multiphysics для работы с гидродинамикой жидкости выбран раздел Fluid dynamics/study-state analysis, далее прорисовывалась геометрия объекта моделирования, устанавливались граничные условия, свойства жидкости и задавалась сетка для расчёта трубы. В пакете COMSOL Multiphysics решение в выбранном разделе основано на уравнении Навье-Стокса.

Практика показала, что использование при моделировании трубопроводов большой длины в рассматриваемом пакете требует больших временного ресурса и мощности компьютера. Поэтому моделирование проводилось на основе метода подобия, для чего было проведено масштабирование трубопровода.

Моделирование проводилось для трубопровода, параметры которого указаны в таблице 1. Остальные параметры трубопровода и жидкости, транспортируемой по трубопроводу, необходимые для моделирования, были взяты из [2, 6] и также представлены в табл. 1.

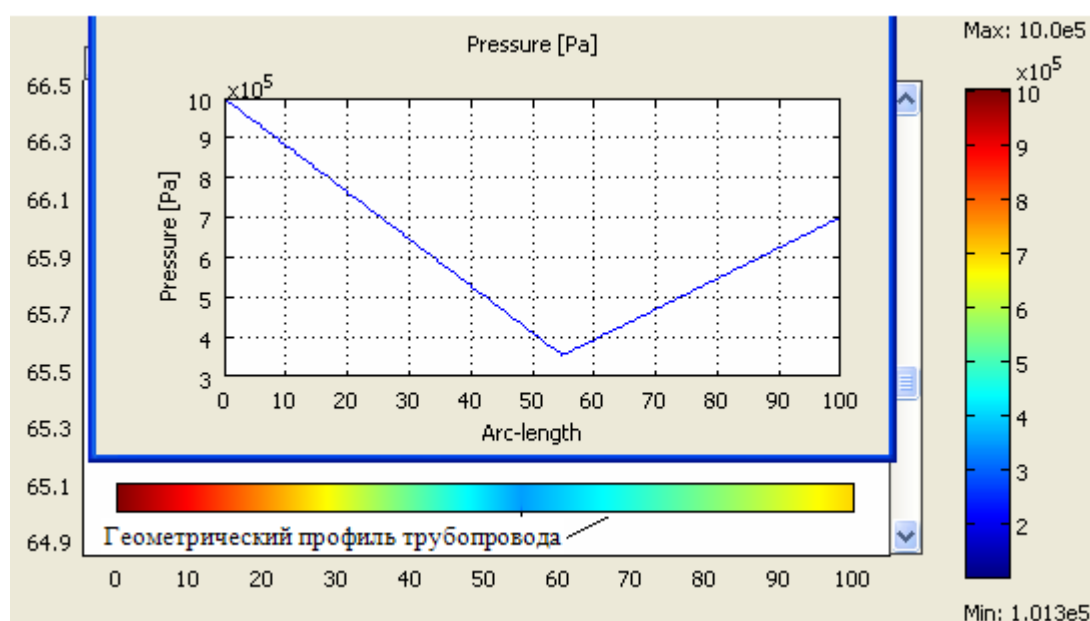
Моделирование проводилось для трёх различных вариантов геометрического профиля трубопровода: прямолинейного без наклона, прямолинейного с наклоном и в виде сигмоидальной функции.

При моделировании первого варианта был построен прямолинейный трубопровод без наклона при наличии утечки в нём с координатой  $\xi=55$  м и условным диаметром отверстия  $d_\xi=0,02$  м. В COMSOL Multiphysics был получен график профиля давления, представленный на рис. 2. Из графика видно, что в месте прорыва трубопровода ( $\xi=55$  м) происходит надлом кривой, параметры которого могут быть вычислены по формулам (3).

**Таблица 1.** Значения параметров трубопровода и транспортируемой жидкости

Обозначения	Название	Значение	Единица измерения
Параметры трубопровода			
$l$	Длина	100	м
$d$	Диаметр	0,1	м
$F$	Площадь сечения	$7,85 \cdot 10^{-3}$	$\text{м}^2$
$P_H$	Давление в начале трубы	1000000	Па
$P_K$	Давление в конце трубы	700000	Па
Параметры транспортируемой жидкости			
$\rho$	Плотность	817	$\text{кг/м}^3$
$w$	Скорость движения	1,2	м/с
$\nu$	Кинематическая вязкость	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$\text{м}^2/\text{с}$
$C$	Скорость звука	975	м/с

Примечание: скорость звука  $C$  зависит от толщины стенок трубопровода, принятой 0,005 м

**Рис. 2.** Прямолинейный трубопровод с утечкой и график профиля давления, построенный в COMSOL Multiphysics

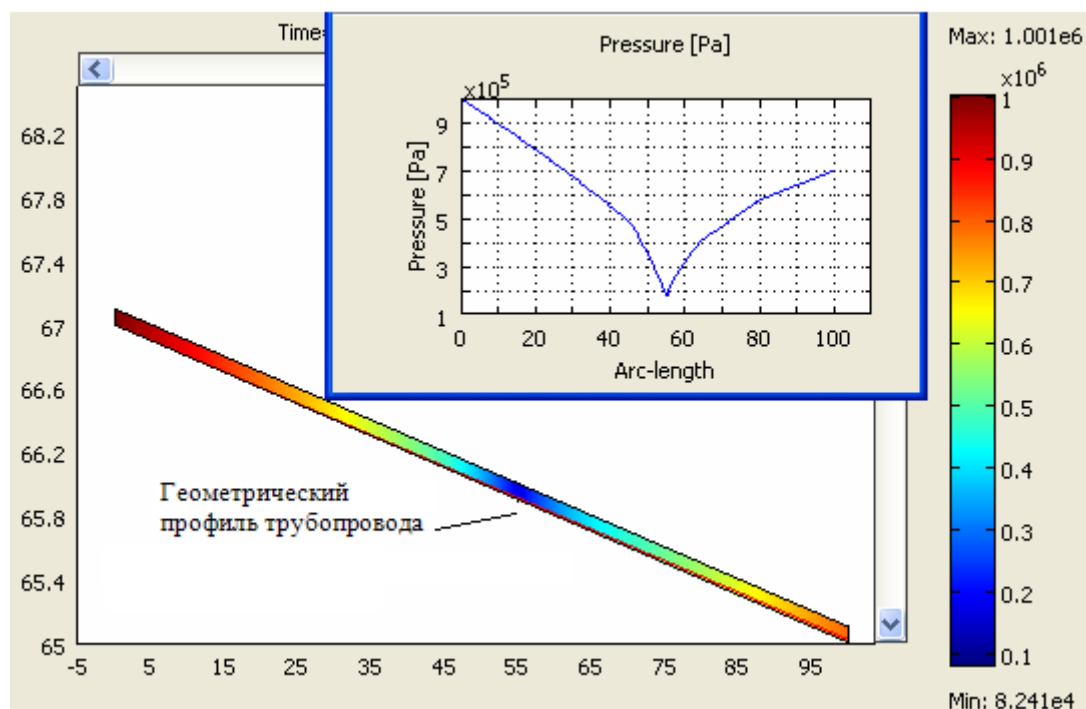
Второе испытание проводилось для наклонного трубопровода при тех же значениях параметров трубопровода и транспортируемой жидкости с утечкой по координате  $\xi=55$  м и условным диаметром отверстия  $d_\xi=0,02$  м. График профиля давления, изменяющийся по длине трубопровода, представлен на рис. 3.

Третий эксперимент проводился для трубопровода с геометрическим профилем, описанным функцией:

$$z(x) = 20 - \frac{20}{1 + e^{-0.1(x-50)}} \quad (4)$$

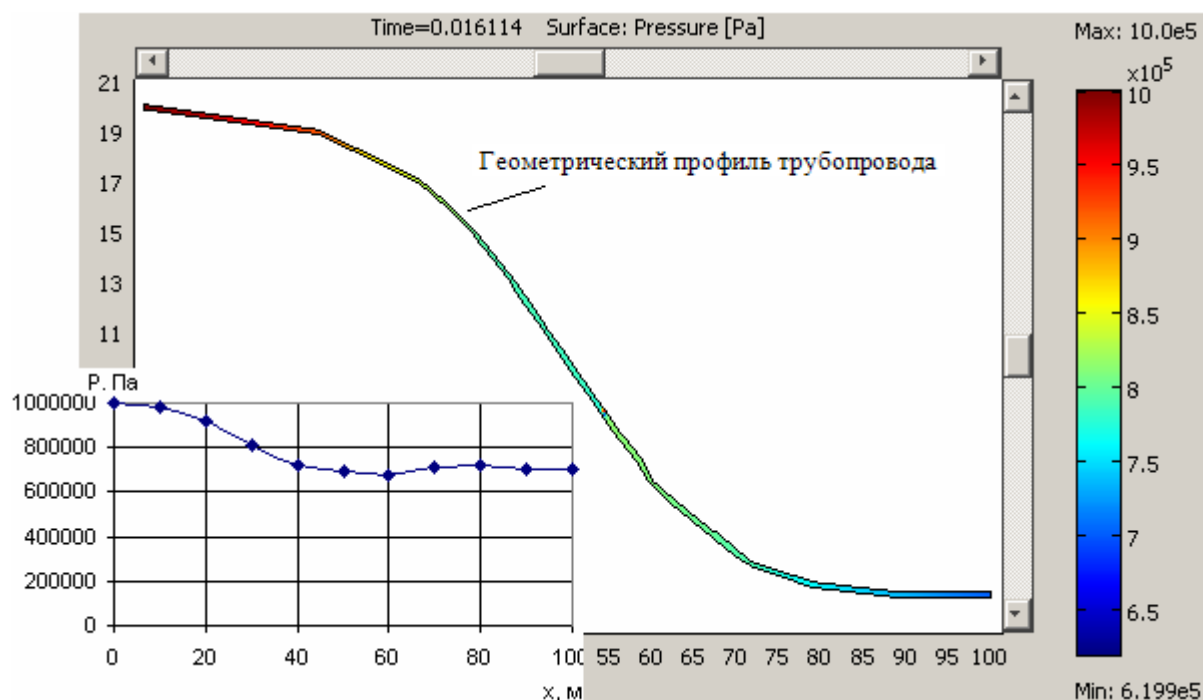
При этом место утечки из трубопровода располагается по координате  $\xi=55$  м и условным диаметром отверстия  $d_\xi=0,02$  м.

В пакете COMSOL Multiphysics для объектов сложной формы получить точный геометрический профиль на протяжении всей длины трубопровода невозможно.



**Рис. 3.** Наклонный трубопровод с утечкой и график профиля давления, построенный в COMSOL Multiphysics

Поэтому для реализации трубопровода в виде сигмоидальной функции была произведена интерполяция функции и построено конечное число точек, координаты которых были рассчитаны по формуле (4). По результатам эксперимента были сняты показания давлений с шагом 10 м и в программном пакете Microsoft Excel построен профиль давления, представленный на рис. 4.



**Рис. 4.** График трубопровода сложной формы с утечкой, построенный в COMSOL Multiphysics и его профиль давления

По представленным графикам видно, что даже при наличии минимального изменения геометрического профиля трубопровода, профиль давления в трубе с утечкой приобретает сложный характер. Следовательно, для расчёта параметров утечки необходимо воспользоваться универсальными алгоритмами определения параметров утечки, полученных через гидравлические уклоны (3).

Объёмный расход жидкости  $Q$  по координате утечке при диаметре условного отверстия утечки  $d_\xi$  может быть определён по формуле [7]:

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2gH_\xi},$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода (примем равным 1),  $S_0$  – площадь условного отверстия утечки [ $\text{м}^2$ ],  $H_\xi$  – значение гидравлического напора в месте утечки [ $\text{м}$ ].

Считая, что массовый расход жидкости  $G_T = \rho \cdot Q$ , получим формулу для расчёта массового расхода жидкости при утечке в виде:

$$G_T = \mu \rho S_0 \sqrt{2 \frac{P_\xi - P_{atm}}{\rho}} \quad (5)$$

где  $P_{atm} = 101325$  Па – атмосферное давление.

Полученная формула (6) использовалась для расчёта значения массового расхода по данным, полученным в пакете COMSOL Multiphysics.

Для проверки адекватности алгоритмов обнаружения параметров утечки (3) проведён расчёт в математическом пакете MathCAD. При этом предполагалось, что по длине трубопровода расположено два датчика давления в местах с координатами  $x_1=30$  м,  $x_2=70$  м. Данные расчёта параметров утечки для рассмотренных геометрических профилей трубопровода показаны в табл. 2.

**Таблица 2.** Расчёт параметров утечки

№	Геометрический профиль трубы	Заданные значения в COMSOL Multiphysics		Рассчитанные значения по алгоритмам (4)		Погрешности расчёта	
		$\xi$ , м	$G_T$ , кг/с	$\xi$ , м	$G_T$ , кг/с	$\delta_\xi$ , %	$\delta_{G_T}$ , %
1	Прямолинейный без наклона	55,000	6,460	55,160	6,597	0,160	2,121
2	Прямолинейный с наклоном	55,000	6,460	55,469	6,779	0,469	4,938
3	Сигмоидальный	55,000	10,462	55,640	9,764	0,640	6,672

Проведённые эксперименты показали, что полученные алгоритмы для расчёта параметров утечки (массового расхода и координаты) из трубопровода с учётом его геометрического профиля дают результат с погрешностью не более 0,640 % для координаты утечки и 6,672 % для массового расхода, что доказывает возможность их применения при наличии трубопровода со сложным геометрическим профилем. При этом ошибка вычисления увеличивается при повышении сложности геометрического профиля трубопровода. Данная ошибка в большей степени наблюдается при вычислении массового расхода утечки.

В представленной работе были получены алгоритмы определения параметров утечки (координаты и массового расхода). Исследованы три случая геометрического профиля трубы: 1) прямолинейный трубопровод без уклона, 2) прямолинейный трубопровод с уклоном, 3) трубопровод сложной формы в виде сигмоидальной функции. Также получены алгоритмы с учётом геометрического профиля трубы через гидравлические характеристики. Полученные алгоритмы проверены на работоспособность в программном пакете COMSOL Multiphysics.

В дальнейшем планируется апробация универсальных алгоритмов определения параметров утечки для более сложных видов геометрического профиля трубопровода, а также реализация динамических процессов протекания жидкости в трубе в программе COMSOL Multiphysics.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Исследование алгоритмов обнаружения утечек в трубопроводах, построенных на основе моделей гидродинамических процессов // Современная техника и технологии: Труды VIII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2006. – Т. 1. – С. 248–251.
2. Степанченко Т. Е. , Шкляр В. Н. Оценка точности алгоритма определения параметров утечки. // Известия Томского политехнического университета. – 2011 – Т. 318 – №. 4 – С. 37–42.
3. Шкляр В.Н. Пространственно-комбинационный метод определения параметров утечки в магистральном нефтепроводе // Автоматическое управление и информационные технологии: межвузовский научно-технический сборник. Выпуск 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 221–226.
4. Вайншток С.М. Трубопроводный транспорт нефти / С.М. Вайншток, В.В.Новосёлов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов: учебник для вузов в 2 т. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 1. – 407 с.
5. COMSOL Multiphysics. Численное моделирование физических процессов. URL: <http://www.eurointech.ru/comsol>. (дата обращения 21.06.2011).
6. Справочник химика. Т. 5: Сырье и продукты промышленности неорганических веществ. Процессы и аппараты. Коррозия. Гальванотехника. Химические источники тока. / под ред. Б. П. Никольского. –М. – Л.: Химия, 1968. – 974 с.
7. Истечение через малые отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре. URL: <http://gidravl.narod.ru/istechenie.html> (дата обращения 10.10.2011).

Поступила 29.06.2011 г.